

Forschung und Entwicklung in der Silizium-Photovoltaik: heute und morgen

Photovoltaik (PV) und Markt

Die PV-Technologie generiert elektrische Energie aus Licht mittels des inneren Photoeffekts in Halbleiterstrukturen. Diese Technologie hat in den vergangenen zwei Jahrzehnten für die terrestrische Energieproduktion aus Sonnenlicht eine sehr erfolgreiche Entwicklung genommen und stellt heute eine der wichtigsten erneuerbaren Energien dar.

► *Abbildung 1a* zeigt die Entwicklung des PV-Weltmarktes zwischen 2006 und 2016. Ende 2016 waren weltweit PV-Anlagen mit einer Kapazität von über 330 GW installiert, davon etwa 41 GW in Deutschland, die etwa 6,9% des deutschen Nettostromverbrauchs abdecken [1]. Dabei verwenden über 90% der installierten Solarmodule Silizium als Absorbermaterial. Auch für die Zukunft wird ein weiteres rasantes Marktwachstum erwartet (siehe exemplarisch ► *Abbildung 1b*). Alle Studien, die sich mit der Energiewende beschäftigen, zeigen, dass Wind- und Photovoltaiktechnologie die Basistechnologien für eine erfolgreiche Wende sein werden. Ohne diese Technologien ist eine Umstellung auf ein CO₂-freies Energiesystem über alle Sektoren (Strom, Wärme, Mobilität und Industrie) nicht machbar. Die mit dem Modell ReModD am Fraunhofer ISE [2] durchgeführten Rechnungen für techno-ökonomische Szenarien mit der Randbedingung der derzeit politisch vorgegebenen Ziele (80% CO₂-Reduktion bis 2050 bezogen auf das Referenzjahr 1990) zeigen deutlich den hohen Bedarf von 120 bis 400 GW an PV-Installationen in Deutschland. Die Marktentwicklung steht also erst am Anfang. Dies gilt dann nicht nur für Deutschland sondern auch global.

Ermöglicht wurde die bisherige PV-Entwicklung durch intensive, auch öffentlich geförderte, Zusammenarbeit von Forschung und Industrie, wobei Deutschland im Bereich F&E einen Spitzenplatz einnimmt und im Bereich Maschinenbau weltweit führend ist. Die über F&E erreichte Verbesserung von Produkten, Prozessen und Anlagentechnologie sowie das Skalenwachstum bewirkten eine Preisreduktion von PV-Modulen von 23,4 Euro/W_p im Jahr 1980 auf unter 0,4 Euro/W_p im Jahre 2016, also um einen Faktor 53 [1]. Die Kostenreduktion geht auch in den kommenden Jahren weiter. Diese Entwicklung beförderte die PV von einer Außenseiterrolle im Erneuerbare-Energien-Portfolio zu einer tragenden Säule der nationalen und globalen Energiewende. Die treibende Rolle bei dieser Entwicklung spielte zunächst

das deutsche Energieeinspeisegesetz (EEG), welches von einer Vielzahl von anderen Ländern übernommen wurde und dadurch ein starkes globales Wachstum ermöglichte.

Auch die deutsche Industrielandschaft hat von der PV-Entwicklung profitiert. In den Jahren 2005–2009 hatten deutsche Zell- und Modulfirmen die internationale Führerschaft und es wurden in Deutschland auch viele Gigawatt an PV-Leistung installiert. China hat danach die Produktionsführerschaft bei Solarzellen und Modulen übernommen und dabei ein rasantes Wachstum erreicht. Dies verschärfte den weltweiten Wettbewerb und führte zu Insolvenzen in Deutschland. Die Zell- und Modulproduktion sollte in Deutschland – auch durch einen wachsenden Heimatmarkt – wieder gestärkt werden. Nur so können wir auch von diesem Teil der Wertschöpfungskette wirtschaftlich profitieren.

Dazu sind erhöhte F&E-Anstrengungen notwendig, um sich mit neuen technologischen Konzepten aus dem Labor vorteilhaft im Weltmarkt positionieren zu können. Trotz des Druckes auf die Zell- und Modulhersteller profitiert derzeit die deutsche Industrie im Bereich der Materialien als Zulieferer und hat im Bereich des Maschinenbaus zur Herstellung des Produktionsequipments noch eine führende Stellung inne, die es auszubauen gilt. Dies wird auch durch weitergehende F&E-Arbeiten gesichert.

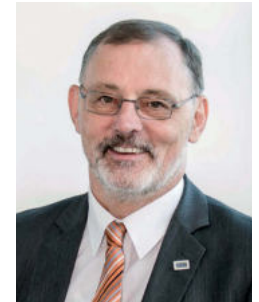
Die wesentlichen Aufgaben der F&E sind

- Prozessoptimierung,
- Steigerung der Wirkungsgrade und des Durchsatzes
- sowie die Verbesserung der Nachhaltigkeit in der gesamten Produktionskette.

Um diese F&E-Aufgaben umzusetzen, ist auch weiterhin öffentliche Förderung in den nächsten Jahren notwendig. Hier gilt es insbesondere, die Kontinuität der Förderung zu bewahren und gleichzeitig die richtigen Rahmenbedingungen zu setzen.

Kristallines Silizium – Industrielle Entwicklungen

Etwa 93% aller installierten Module bestehen aus mono- oder multi-kristallinem Silizium (c-Si). Betrachtet man die käuflich zu erwerbenden Modulwirkungsgrade, so liegen diese im Bereich von 16%–24%, wobei sich der Marktanteil für die Top-



Fraunhofer ISE

Dr. Andreas Bett
andreas.bett@ise.fraunhofer.de

Prof. Dr. Stefan Glunz
stefan.glunz@ise.fraunhofer.de

Dr. Harry Wirth
harry.wirth@ise.fraunhofer.de

HZB

Prof. Dr. Rutger Schlatmann
rutger.schatmann@helmholtz-berlin.de

Dr. Bernd Stannowski
bernd.stannowski@helmholtz-berlin.de

ISFH

Prof. Dr. Rolf Brendel
rolf.brendel@isfh.de

Dr. Bianca Lim
lim@isfh.de

FZ Jülich

Dr. Kaining Ding
k.ding@fz-juelich.de

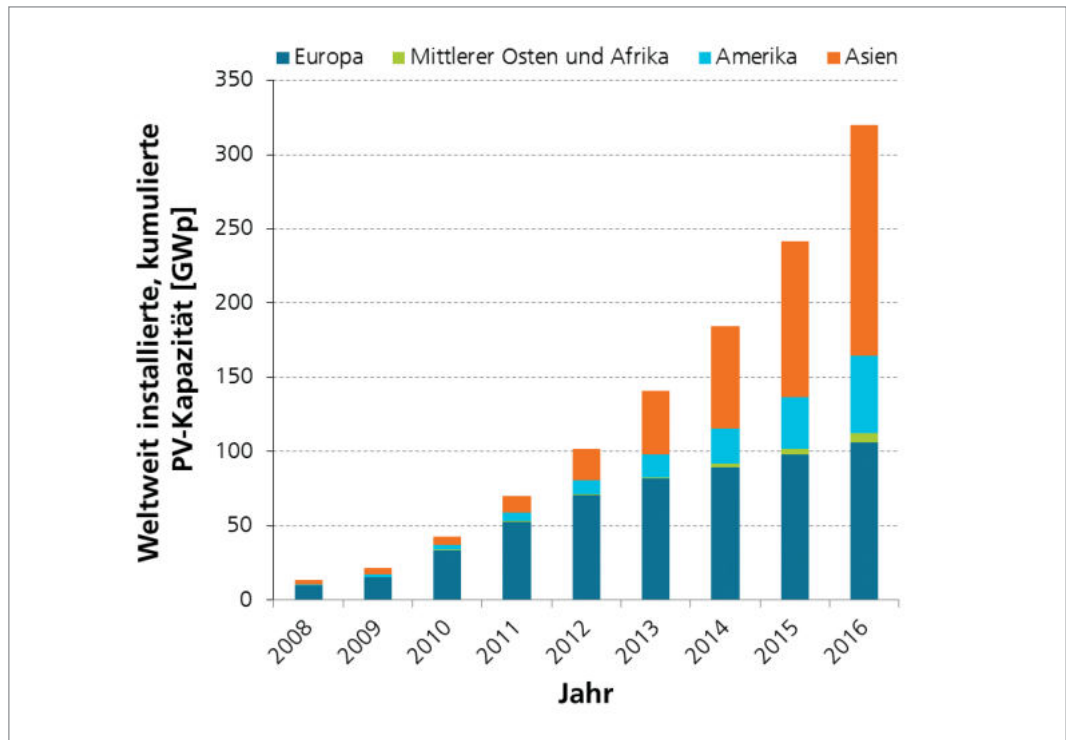
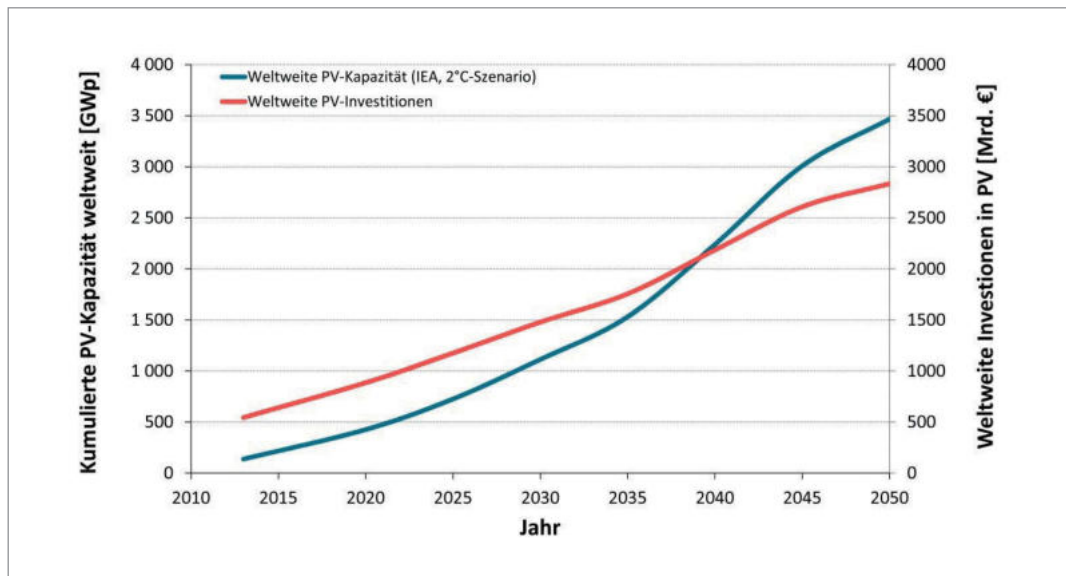


Abbildung 1

a) Entwicklung der kumulierten PV-Leistung weltweit zwischen 2006 und 2016 [1]

b) Szenario der IEA für die langfristige Entwicklung des PV-Marktes [3]. Auf der rechten Achse ist entsprechend das geschätzte, kumulierte Marktvolumen nach eigenen Berechnungen aufgetragen.



klassen im unteren Prozentbereich befindet. Der weitaus dominierende Teil liegt im Wirkungsgradbereich bis 20%. Der Grund ist in der bisher verwendeten Solarzellenstruktur zu sehen, die vergleichsweise einfach aufgebaut ist und als Al-BSF (Aluminium-Back Surface Field) Zelle bezeichnet wird. Diese in [Abbildung 2a](#)) gezeigte Zellstruktur verwendet auf der Vorderseite eine mit einer dünnen, optisch transparenten Schicht versehene Textur, welche eine effiziente Lichteinkopplung und geringe elektrische Verluste an der Vorderseite der Solarzelle erlaubt. Auf der Rückseite wird eine flächige Aluminiumschicht aufgebracht, welche auch als Rückseitenkontakt

dient. Diese Solarzellenarchitektur wurde zunächst im Labor und dann auch in der industriellen Produktion über viele Jahre optimiert und hat heute einen typischen Produktionswirkungsgrad von ca. 20% erreicht, siehe [Abbildung 2b](#). Diese Solarzellenstruktur kommt damit an ihr Wirkungsgradlimit und es müssen neue Solarzellenarchitekturen industriell realisiert werden, welche schon vor einiger Zeit im Labor entwickelt wurden.

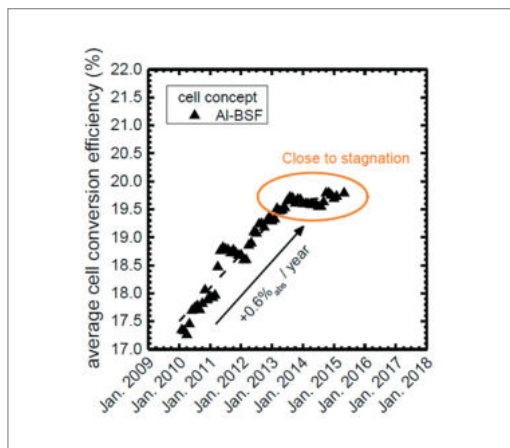
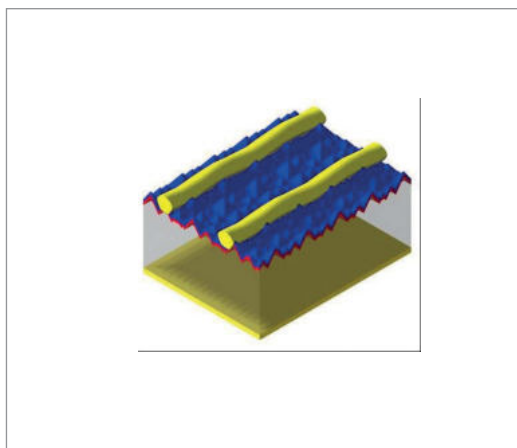


Abbildung 2

a) Al-BSF (Aluminium-Back Surface Field) Solarzelle (schematischer Aufbau)

b) Entwicklung der Wirkungsgrade von Al-BSF-Solarzellen in der industriellen Produktion (nach [7]).

Derzeit werden daher PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) wie sie beispielhaft in ► *Abbildung 3a* dargestellt sind, industriell eingeführt. Der zentrale Unterschied zur Al-BSF Struktur ist, dass an der Rückseite der Solarzelle eine technologisch aufwändigere Prozessfolge eingeführt wird, um die elektrischen Verluste an der Rückseite der Solarzelle zu minimieren. Dazu wird die Oberfläche mit einer flächigen, dielektrischen Schicht versehen, die dann lokal geöffnet wird, um einen direkten Halbleiter-Metall-Kontakt zur Abführung des Stroms zu ermöglichen. Der Vorteil dieser Technologieabfolge ist, dass auch auf der Rückseite ein Metallgitter statt eines flächigen Kontakts aufgebracht werden kann [4]. Somit kann auch die Rückseite der Solarzelle beleuchtet werden und dieser Beitrag kann zu einer weiteren Ertrags-erhöhung in speziellen Anwendungsfällen führen. Solche Solarzellen werden Bifazial- oder PERC+ Zellen genannt und werden z. B. von SolarWorld produziert. Bei entsprechender Anwendung kann hier bis zu 30% mehr Ertrag aus einer Zelle erwartet werden. Mit PERC-Solarzellen werden heute in der industriellen Produktion bereits Wirkungsgrade > 21% erzielt, im Labor wurden bis zu 25% nachgewiesen [5]. Die PERC-basierenden Strukturen werden derzeit in großem Stil in die industrielle Produktion eingeführt und es ist in den kommenden Jahren durch konti-

nuierliche F&E mit weiteren Wirkungsgradsteigerungen zu rechnen. In der industriellen Umsetzung werden Wirkungsgrade bis 23,5%–24,0% möglich sein [6], siehe ► *Abbildung 3b*. Sind diese Wirkungsgrade in der Produktion erreicht, stößt man erneut an Grenzen und es müssen neue Strukturen eingeführt werden, die sich heute bereits in der Forschung befinden.

Kristallines Silizium – Status Vorlaufforschung

Eine Weiterentwicklung der PERC-Solarzellenstruktur beinhaltet eine Reduzierung der elektrischen Verluste am Halbleiter-Metall-Kontakt durch sogenannte passivierende Kontakte. Dazu wurden in den vergangenen Monaten an den Instituten neue Technologien entwickelt. So wurde beim Fraunhofer ISE das TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact)-Konzept und am ISFH der POLO (Poly-Si-on-Oxide)-Kontakt entwickelt. Für technologisch Interessierte sei auf die weiterführende Literatur verwiesen [9, 10]. Beide Technologien verwenden eine dünne passivierende dielektrische Schicht worauf eine Schicht Poly-Silizium folgt. Das am Fraunhofer ISE entwickelte TOP-Con-Konzept wurde sehr erfolgreich auf n-dotiertes

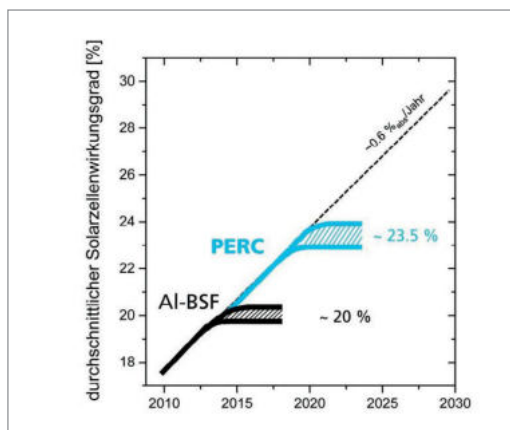
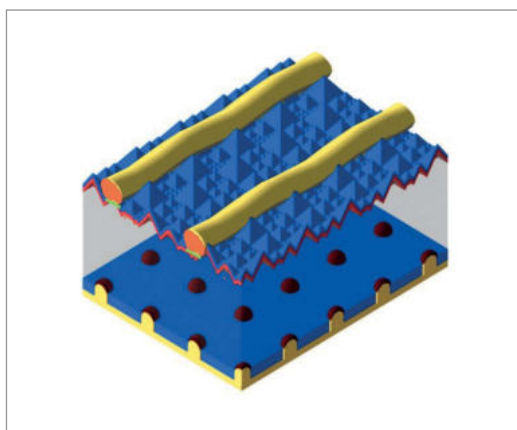


Abbildung 3

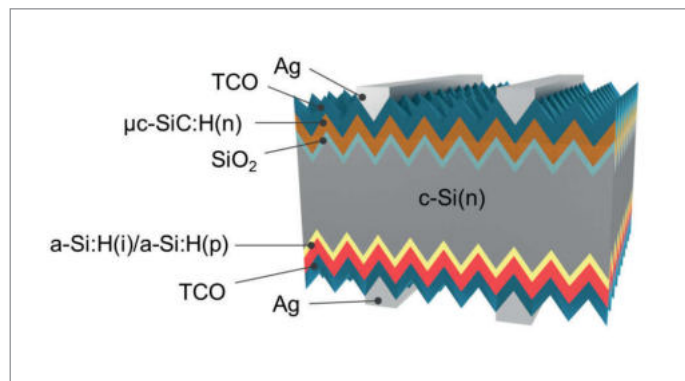
a) PERC (Passivated Emitter and Rear Cell)-Solarzelle (schematischer Aufbau)

b) Entwicklung und Prognose der Wirkungsgrade von PERC-Solarzellen in der industriellen Produktion (nach [8]).

Tabelle 1
Spitzenwirkungsgrade
 von *c*-Si-Solarzellen mit
 passivierten Kontakten
 sowie von Mehrfach-
 solarzellen auf Silizium
 * bestätigt vom Fraunhofer ISE
 Callab
 ** bestätigt vom ISFH-CalTeC

Konzept	Material	Area	Voc [mV]	Jsc [mA/cm ²]	FF [%]	H [%]
TOPCon	<i>n</i> -Typ Mono	4 cm ² (da)	724	42,9	83,1	25,8*
TOPCon	<i>n</i> -Typ Multi	4 cm ² (da)	674,2	41,1	80,5	22,3*
TOPCon	<i>n</i> -Typ Mono	100 cm ² (ap)	713	41,4	83,1	24,5*
POLO	<i>n</i> -Typ Mono	244,15 cm ² (t)	714	38,5	81,1	22,3
POLO	<i>p</i> -Typ Mono	3,97 cm ² (da)	723	41,9	82,6	25,0**
Mehrfachsolarzelle, monolithisch	GaInP/GaAs/ <i>c</i> -Si	3,984 cm ² (ap)	3127	12,7	83,8	33,3
Mehrfachsolarzelle, mechanisch gestapelt	GaInP/GaAs// <i>c</i> -Si	1 cm ² (da)	2535 670	13,43 10,4	87,9 78,8	35,4

Abbildung 4
Solarzelle mit
pn-Heterostruktur
 (schematische Darstellung)



Siliziummaterial angewandt. Mit dem am ISFH entwickelten POLO-Konzept wurden sehr erfolgreich Rückkontaktsolarzellen hergestellt, die für beide Kontakte POLO-Schichten verwenden.

► **Tabelle 1** zeigt die im Labor erzielten Spitzenwirkungsgrade.

Anzumerken ist, dass die erzielten Werte für das mono-kristalline mit 25,8% sowie für das multi-kristalline Silizium mit 22,3% die weltweit besten Wirkungsgrade für beidseitig kontaktierte Solarzellen darstellen. Am ISFH wurden *n*- und *p*-dotierte POLO-Kontakte bereits mit Siebdruckmetallisierung verknüpft und damit Wirkungsgrade von 22,3% erzielt, siehe ► **Tabelle 1**. Die Technologie der passivierten Kontakte lässt somit auch in industrieller Umsetzung Wirkungsgrade mit mehr als 25% erwarten (siehe auch ► **Abbildung 7**)

Ein weiterer Ansatz mit Potenzial für höhere Wirkungsgrade ist eine Solarzellenstruktur, die den *pn*-Übergang nicht nur im Siliziummaterial realisiert, sondern über eine *pn*-Heterostruktur. Hier erfolgt die Funktionalisierung der Solarzelle über sehr dünne intrinsische Passivier- und dotierte Kontaktschichten. Beispielhaft ist eine solche Struktur in ► **Abbildung 4** gezeigt.

Weitere Dünnschichtmaterialien, die auf beiden Seiten der Solarzelle zum Einsatz kommen, sind μ c-Si:H

und μ c-SiOx:H. Diese sogenannte SHJ (Silizium Heterojunction) oder HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin Layer)-Solarzellen haben den Vorteil, dass sehr hohe offene Klemmspannungen aufgrund der sehr guten Oberflächenpassivierung möglich sind und dass niedrigere Prozesstemperaturen eingesetzt werden. Eine Herausforderung bei dieser Struktur ist die Bereitstellung geeigneter Heteromaterialien, die einerseits eine hohe optische Transparenz und andererseits eine gute elektrische Leitfähigkeit haben sollen. Zudem soll die Oberfläche gut passivierbar sein, um die elektrischen Verluste zu minimieren. Derartige Solarzellen haben Spitzenwirkungsgrade von 25,1% erreicht [11]. Derzeit entstehen die ersten Fabriken, die SHJ-Solarzellen und -module in Massenproduktion fertigen.

Schließlich wird noch der technologische Ansatz verfolgt, die Abschattungsverluste durch das Metallgrid auf der Vorderseite zu vermeiden, indem beide Kontakte der Solarzelle auf der Rückseite platziert werden. Dieser Ansatz wird BJC (back-junction cell) genannt. In Kombination mit dem HIT-Ansatz wurde in einer Zelle der Firma Kaneka der derzeitige Rekordwirkungsgrad von 26,7% für eine Silizium-solarzelle realisiert [5]. Bis diese Technologie in großem Maßstab kostengünstig in der industriellen Umsetzung sein wird, müssen noch mehrere Jahre Entwicklungsleistungen erbracht werden, siehe auch ► **Abbildung 7**.

Mehrfachzellen auf c-Si

Das physikalische Limit für reine Siliziumsolarzellen wurde schon vor Jahren mit 29,4% [12] berechnet. Mit dem heutigen Laborrekordwert ist man schon sehr nahe an dieser physikalischen Grenze angelangt. Um diese physikalische Barriere zu überwinden, muss Silizium mit anderen Materialien kombiniert werden. Stapelsolarzellen sind aus unterschiedlichen Materialien mit dann zwei oder mehreren pn-Übergängen zusammengesetzt. Sie können monolithisch zusammengesetzt und damit mit nur einem Front- und Rückkontakt kontaktiert werden oder aber mit einer separaten Kontaktierung jedes pn-Übergangs realisiert werden, siehe ► *Abbildung 5*.

Das Ziel ist, durch eine bessere Ausnutzung des Sonnenspektrums den theoretischen Wirkungsgrad von Einfachzellen deutlich zu übertreffen. Die Technologie wird schon seit vielen Jahren mit III-V-Halbleitern für die Anwendung im Weltraum auf Satelliten und in terrestrischen Konzentratorsystemen genutzt. So wurde der höchste Solarzellenwirkungsgrad von 46,1% mit einer 4-fach Zelle auf Basis der III-V-Halbleiter und unter konzentrierter Lichteinstrahlung erzielt [13].

► *Abbildung 6* zeigt graphisch, wie Materialien mit unterschiedlicher Bandlücke das Sonnenspektrum effizienter nutzen können. Die hochenergetischen Photonen im blau/grün/gelben Spektralbereich werden in Materialien mit höherer Bandlücke als Silizium aufgrund geringerer Thermalisierungsverluste effizienter genutzt. Es gibt verschiedene Halbleitermaterialien, die als Oberzelle(n) auf c-Si-Solarzellen aufgebracht werden könnten. Vielversprechende Optionen sind III-V-Halbleiter, Perowskite und auch Chalkopyrite. In jüngerer Zeit wurden bereits erfolgreiche Experimente mit III-V-Halbleitern auf Si durchgeführt. So wurde kürzlich eine Dreifachszelle mit einer Unterzelle aus aktivem Silizium realisiert. Hierbei wurde die Wafer-Bonding-Technologie eingesetzt, bei der zwei Halbleiterstrukturen auf atomarer Ebene verbunden werden, so dass diese letztlich ein monolithischer Block sind. Solche monolithischen

Dreifachzellen auf c-Si wurden am Fraunhofer ISE hergestellt und erzielen einen Wirkungsgrad von 33,3%. Herausforderungen bestehen insbesondere darin, dass die Material- und die Produktionskosten gesenkt werden müssen. Eine Alternative zu monolithischen Mehrfachszellen ist die Realisierung eines mechanischen Stapels. Hier werden zwei separat entwickelte Solarzellen so übereinander positioniert, dass das transmittierte Licht aus der Oberzelle in der Unterzelle gewandelt werden kann. Die beiden Solarzellen haben jeweils eine separate elektrische Kontaktierung. Ein solcher Ansatz wurde am ISFH in Zusammenarbeit mit dem NREL in den USA erprobt und es konnte ein Wirkungsgrad von 35,4% demonstriert werden [14].

Zusammenfassung

Die Entwicklung der Si-Solarzelle verzeichnete in den letzten Jahren große Fortschritte. Zunächst ist die erfolgreiche industrielle Umsetzung zu benennen. Die Al-BSF Solarzelle ist zum Massenprodukt geworden und erreicht Spitzenwirkungsgrade von 20%. Um den Wirkungsgrad weiter zu steigern, setzt die Industrie auf die PERC-Strukturen, mit denen in der Endausbauphase Wirkungsgrade von ca. 24% in der industriellen Fertigung möglich sein sollten. Im Labor werden bereits die weitergehenden Konzepte erprobt und gezeigt, dass noch höhere Wirkungsgrade möglich sind.

Ein nächster Technologieschritt ist neue passivierte Kontaktstrukturen zu entwickeln. Hier wurden im Labor an deutschen Forschungsinstituten schon Spitzenwirkungsgrade von 25,7% für monokristallines und 22,3% für multikristallines Silizium erzielt. Kombiniert man diese Technologie mit dem Konzept der Heterojunction und des Rückseitenkontaktierens sind auch Wirkungsgrade nahe 28% möglich. Damit wird die physikalische Grenze von 29,4% für Silizium fast erreicht.

Die nächste Generation von Solarzellen werden Mehrfachszellen mit Silizium als Unterzelle sein.

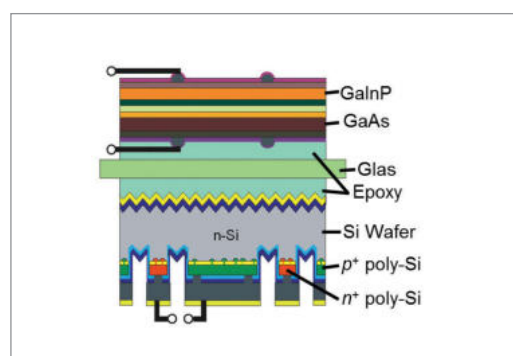
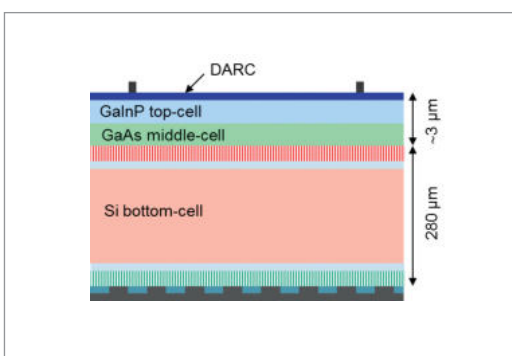


Abbildung 5
Stapelsolarzellen auf Silizium in monolithischer Bauweise (a) und mit separaten Teilzellen (b).

Abbildung 6

Effiziente Ausnutzung des Sonnenspektrums durch Mehrfachsolarzellen.

b) Einfachsolarzelle mit nur einem Absorbermaterial:

Hier entstehen Verluste durch Transmission (niederenergetisches (rotes) Licht) und durch Thermalisierung (hocheenergetisches (blaues) Licht).

a) und c) Mehrfachsolarzellen verwenden Teilzellen mit unterschiedlichen Absorbermaterialien. Diese verwerten verschiedene Anteile des Sonnenspektrums und reduzieren so Verluste.

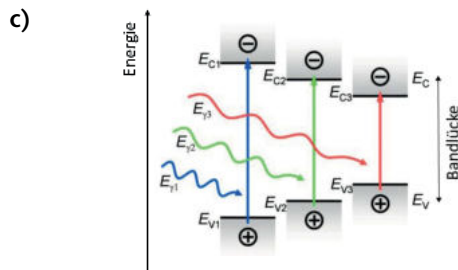
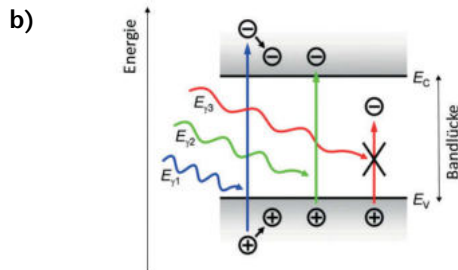
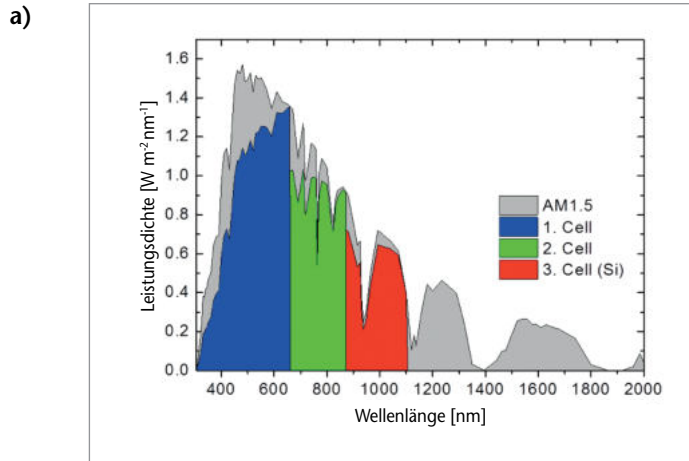
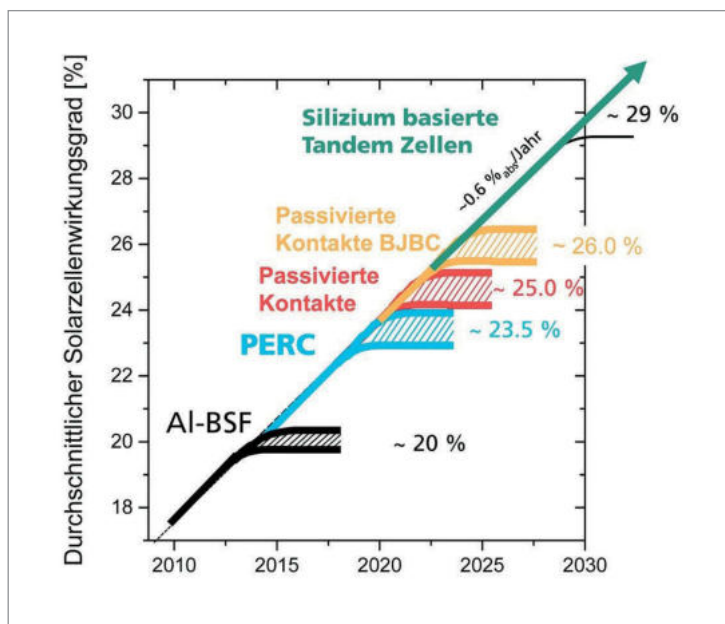


Abbildung 7

Entwicklung und Prognose der Wirkungsgrade verschiedener Solarzellenkonzepte in der industriellen Produktion (nach [8]).



Als Material für die Oberzellen kommen Perowskite oder die III-V-Halbleiter in Frage. Mit den III-V Halbleitern und mechanischer Stapelung wurde bereits ein Wirkungsgrad von 35,4% und im monolithischen Fall von 33,3% demonstriert.

Die F&E im Bereich der Photovoltaik hat noch große Aufgaben vor sich. Die Herstellungskosten konnten in der Vergangenheit schon dramatisch reduziert werden, so dass in Deutschland im besten Fall der mit PV erzeugte Strom unter 5 €cent/kWh kostet. Die Kostensenkung wird weitergehen. Künftig werden ökologische Aspekte noch stärker in den Fokus rücken. So gilt es, die Produktionskette vom Ursprung bis zur Entsorgung nachhaltig zu gestalten und damit die globalen Ressourcen in allen Aspekten zu schonen. Die Photovoltaiktechnologie ist eine der zentralen Säulen für die globale Energiewende und bietet damit ein riesiges Marktpotenzial. Deutschland ist aktuell sowohl technologisch als auch wirtschaftlich sehr gut aufgestellt, um von der Zukunftstechnologie Photovoltaik zu profitieren.

Quellenverzeichnis

- [1] Fraunhofer ISE, Photovoltaics Report, (2017).
- [2] Henning, H.-M. and Palzer, A., Was kostet die Energiewende? – Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050, (2015).
- [3] IEA, Energy Technology Perspectives 2016, Paris: International Energy Agency (2016).
- [4] Dullweber, T., Kranz, C., Peibst, R., Baumann, U., Hannebauer, H., Fülle, A., Steckemetz, S., Weber, T., Kutzer, M., Müller, M., Fischer, G., Palinginis, P. and Neuhaus, H., „PERC+: industrial PERC solar cells with rear Al grid enabling bifaciality and reduced Al paste consumption“, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 24, 2016.
- [5] Green, M.A., Hishikawa, Y., Warta, W., Dunlop, E.D., Levi, D.H., Hohl-Ebinger, J. and Ho-Bailie, A.W.Y., „Solar cell efficiency tables (version 50)“, *Progress in Photovoltaics* 25, 2017.
- [6] Min, B., Müller, M., Wagner, H., Fischer, G., Brendel, R., Altermatt, P.P. and Neuhaus, H., „A roadmap toward 24%-efficient PERC solar cells in industrial mass production“, *IEEE Journal of Photovoltaics* 7, 2017.
- [7] Fertig, F., Lantzsch, R., Mohr, A., Schaper, M., Bartzsch, M., Wissen, D., Kersten, F., Mette, A., Peters, S., Eidner, A., Cieslak, J., Duncker, K., Junghänel, M., Jarzembowski, E., Kauert, M., Faulwetter-Quandt, B., Meißner, D., Reiche, B., Geißler, S., Hörnlein, S., Klenke, C., Niebergall, L., Schönmann, A., Weihrauch, A., Stenzel, F., Hofmann, A., Rudolph, T., Schwabedissen, A., Gundermann, M., Fischer, M., Müller, J.W. and Jeong, D.J.W., „Mass production of p-type Cz silicon solar cells approaching average stable conversion efficiencies of 22%“, *Energy Procedia* 124, 2017.
- [8] Hermle, M., *Silicon Solar Cells – Current Production and Future Concepts*, in Annual Conference of the European Technology and Innovation Platform Photovoltaics – ‚PV Manufacturing in Europe‘. 2017: Brussels, Belgium.
- [9] Feldmann, F., Steinhauser, B., Arya, V., Büchler, A., Brand, A.A., Kluska, S., Hermle, M. and Glunz, S.W., Evaluation of TOPCon technology on large area solar cells, in 33rd European PV Solar Energy Conference and Exhibition. 2017: Amsterdam, The Netherlands.
- [10] Peibst, R., Reiter, S., Larionova, Y., Reineke-Koch, R., Brendel, R., Tetzlaff, D., Krügener, J., Wietler, T., Höhne, U., Kähler, J.-D. and Mehlich, H., Building Blocks for Industrial, Screen-Printed Two Sides-Contacted POLO Cells with Highly Transparent ZnO: Al Layers, in 33rd European PV Solar Energy Conference and Exhibition. 2017: Amsterdam, The Netherlands.
- [11] Adachi, D., Hernández, J.L. and Yamamoto, K., „Impact of carrier recombination on fill factor for large area heterojunction crystalline silicon solar cell with 25.1% efficiency“, *Applied Physics Letters* 107, 2015.
- [12] Richter, A., Hermle, M. and Glunz, S.W., „Reassessment of the Limiting Efficiency for Crystalline Silicon Solar Cells“, *IEEE Journal of Photovoltaics* 3, 2013.
- [13] Dimroth, F., Tibbits, T.N.D., Niemeyer, M., Predan, F., Beutel, P., Karcher, C., Oliva, E., Siefert, G., Lackner, D., Fuß-Kailuweit, P., Bett, A.W., Rainer Krause, Drazek, C., Guiot, E., Wasselin, J., Tauzin, A. and Signamarcheix, T., „Four-Junction Wafer-Bonded Concentrator Solar Cells“, *IEEE Journal of Photovoltaics* 6, 2016.
- [14] Rienäcker, M., Kajari-Schröder, S., Niepelt, R., Brendel, R., Peibst, R., Warren, E., Schnabel, M., Stradins, P. and Tamboli, A., Maximum Power Extraction Enabled by Monolithic Tandems Using Interdigitated Back Contact Bottom Cells with Three Terminals, in 33rd European PV Solar Energy Conference and Exhibition. 2017: Amsterdam, The Netherlands.